はじめに

　このテキストは，「原子と原子核」の分野への対応のために，高３トップ＆ハイレベル物理全 48 講の続きとして，「原子と原子核」の分野についてまとめたものです。高３トップ＆ハイレベル物理と同じく，入試に出題された問題を集め，それを通して物理の基本的な考え方が理解できるように編集してあります。講によっては総合的な内容になっているものもありますが，ポイント→例題→テストの３段階チェックで，しつこいくらいに確認をしながら進めていけるはずです。また，各講の内容を理解できているかチェックするテスト＆解説がつけてあります。高３トップ＆ハイレベル物理全 48 講を仕上げた上でゆっくりと，20 世紀の初期に出来上がった量子論の初歩の話を味わってもらえれば，と思います。

　教科書によっては，原子と原子核の章に「宇宙と素粒子」についてやや詳しく載っているものもありますが，このテーマについては，入試にはあまり出題されないと思われます。よって，この講座でもあまり深くはやらず，このテーマに関して過去に出題された問題に触れてみる，という程度にしてあります。実は，この部分は本当におもしろいところで，「宇宙の始まり」「この宇宙がなぜこうなっているのか」「つまるところ，われわれは何からできているのか」などに関わる，物理学の最前線への入り口です。しかし，残念ながらきちんとやるには大学受験のレベルを超えていますし，まだまだ未完成な部分も多く，研究が盛んに行われている部分でもあります。ですから，この講座では詳しくはやれませんが，どうしても気になる君は大学に入ってから是非勉強してみてください。かなりの根気が要るとは思いますが，人類の英知と自然の美しさに感動するはずです !!

　物理に限りませんが，新しいことを身につけるためには根気と，そのための正しい道筋，方法が大切です。このテキストと授業をしっかり理解するように努めましょう。
そのためにはやはり，

1．テキストをざっとみたら授業をしっかり聞いて，ノートをとる。
2．**何も見ずに解けるようになるまで繰り返し解く。**
3．類題などを解き，知識，技術をしっかりと身につける。

の３点を常に意識して進めてください。

　2012 年７月の，CERN による Higgs boson（ヒッグス粒子）の発見のニュースによって，素粒子の標準理論は一応ひとつの完成を迎えました。しかし，何かの終わりは次なるステップの始まりでもあります。この物理学にとって大事な時期に，君に物理とそのおもしろさについて伝えていけることを喜ばしく思います。そして，君の受験の成功のみならず，「標準理論のその先を，この世界の更なる深遠な部分を見せてくれるのが君かもしれない！」ことも密かに期待しています。

中野　喜允

<目次>

第１講　光電効果 …… p. 4
第２講　粒子性と波動性 …… p. 12
第３講　水素原子モデル …… p. 22
第４講　Ｘ線と結晶解析 …… p. 30
第５講　総合演習① …… p. 44
第６講　核反応 …… p. 58
第７講　半減期と年代測定 …… p. 66
第８講　総合演習② …… p. 80
第９講　相対論に関わる問題 …… p. 92
第10講　宇宙と素粒子 …… p. 106

第１講　光電効果

1

次の文章中の空欄①〜③については語句で，④〜⑥は数式で，⑦〜⑨は数値で，記入しなさい。

(i)　金属の表面に波長が短い光を当てると，その金属から電子が外部に飛び出してくる。この現象を（　①　）という。また，このとき飛び出す電子を（　②　）という。

金属内の自由電子が，陽イオンからの引力の束縛をたち切って外部に飛び出すために必要なエネルギー W［J］を（　③　）といい，金属表面に光を当てたとき，光子のエネルギーが W［J］より大きい場合に，金属内から電子が飛び出してくる。振動数 ν（ニュー）［Hz］の光子のエネルギーは，プランク定数を h［J·s］とすると，（　④　）［J］で与えられる。したがって，この光をある金属の表面に当てたときに，飛び出してくる最も速い電子の運動エネルギーは，（　⑤　）［J］で与えられる。さらに，その電子の速さは，電子の質量を m とすると，（　⑥　）［m/s］で与えられる。

(ii)　ある金属の表面に波長が 3.0×10^{-7}m の光を当てたとき，外部に飛び出してきた最も速い電子の速さは 6.3×10^{5}m/s であった。このときの光子のエネルギーは（　⑦　）［J］であり，また，電子の運動エネルギーは（　⑧　）［J］である。したがって，この金属内の自由電子が，陽イオンからの引力の束縛をたち切って外部に飛び出すために必要なエネルギーは（　⑨　）［J］となる。なお，プランク定数は 6.6×10^{-34}J·s，光速は 3.0×10^{8}m/s，電子の質量は 9.1×10^{-31}kg とし，有効数字２桁で求めなさい。

＜ Note ＞

2

図１の装置は，真空のガラス球内壁にはりつけられたアース電位の金属板陰極 K，および陽極 P からなる光電管と，電池 B，可変抵抗 R，電圧計 V，および電流計 A からなる回路とで構成されている。この装置において，いろいろな波長の単色光を照射しながら，陰極 K に対する陽極 P の電圧（陽極電圧）Vを変化させたときに，電流計 A に流れる電流（光電流）Iを測定した。波長が 4.0×10^{-7}m の光を照射したとき，電圧 Vと電流 Iの関係は図２のようになった。次の文章の［ a ］～［ j ］に入れるべき適当な語句または数式を記し，また問いに答えよ。ただし，電気素量を $e=1.6\times10^{-19}$C，光速度を $c=3.0\times10^{8}$m/s，1eV＝1.6×10^{-19}J とする。また数値は有効数字２桁で求めよ。

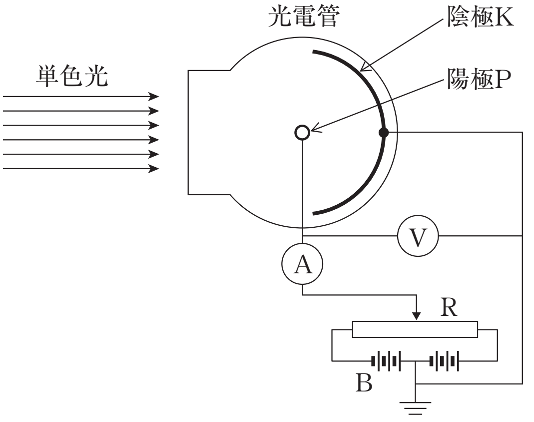


図１

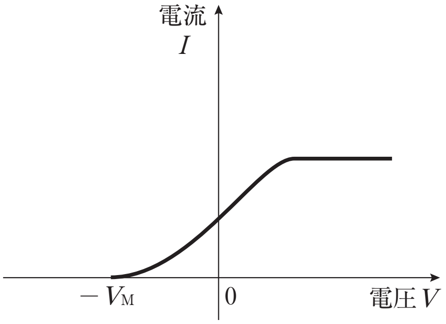


図２

問１．このように光によって電子が飛び出す現象を［ a ］といい，飛び出す電子を［ b ］という。この電子の数が増加するときに光電流の大きさは［ c ］し，１秒間に陽極 P に到達する電子の数を n としたときの電流値は［ d ］［A］となる。

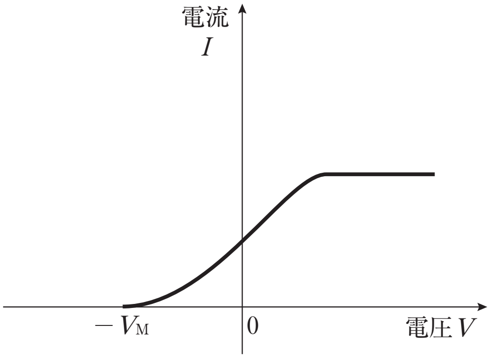
問２．波長が一定で，光の量を２倍に増したとき，陽極電圧 Vと光電流 Iの関係は，図２の状態からどのように変わるか。概略を解答欄の図に実線でかき加えよ。

問３．光の量を変えず，波長を 3.0×10^{-7}m に変えたとき，陽極電圧 Vと光電流 Iの関係は，図２の状態からどのように変わるか。概略を解答欄の図に実線でかき加えよ。

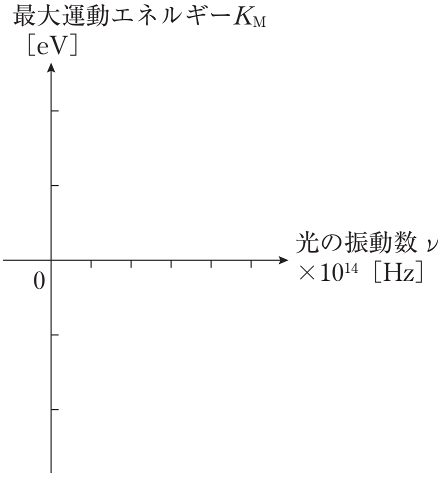
＜ Note ＞

問４．陽極電圧 V が負の範囲になると，電圧の低下にともなって光電流 I は減少し，ついには $I=0$ になる。このときの電圧を $V=-V_{\mathrm{M}}$ [V]，飛び出した電子の最大運動エネルギーを K_{M} [J] とすれば，$K_{\mathrm{M}}-$ [e] $=0$ となる。またこのとき，電子の質量を m [kg] とすれば K_{M} をもつ電子の速さ v_{e} [m/s] は e，m，V_{M} を使って [f] と表される。

問５．陰極Kがナトリウムの光電管では，飛び出した電子の最大運動エネルギー K_{M} の値が，波長 3.0×10^{-7}m の光を照射したときに 1.7eV，5.0×10^{-7}m の光を照射したときに 0.10eV になった。この場合の光の振動数 ν [Hz] と K_{M} [eV] の関係をグラフで表せ。このときグラフの縦軸，横軸に適当な数値を記入せよ。また，波長 4.0×10^{-7}m の光を照射したとき K_{M} の値は [g] eV，ナトリウムの仕事関数 W の値は [h] eV となる。光の振動数 ν が，陰極Kの物質できまる値 ν_0 以下であれば電子は飛び出さない。この ν_0 のことを [i] という。また，物質の仕事関数 W は，この ν_0 とプランク定数 h [J·s] を用いて [j] [J] と表される。ナトリウムの光電管の場合における ν_0 に相当する点を，ν_0 の文字を添えてグラフに記入せよ。



問２，３の解答欄



問５の解答欄

＜ Note ＞

第１講　確認テスト

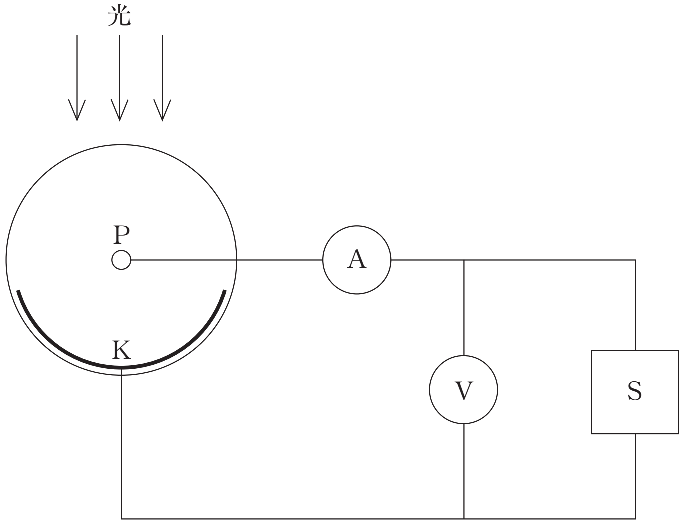
次の文の［(1)］～［(7)］に入れるのに最も適した答を，それぞれの解答群の中から一つずつ選べ。

干渉や［(1)］といった現象は，光が［(2)］としての性質を持つことを示している。一方，物質に紫外線などの光を当てたとき，物質中の電子が光のエネルギーを受け取って飛び出してくる［(3)］効果という現象は，振動数 ν の光が $h\nu$ のエネルギーを持った［(4)］として振る舞うことを示している。以下は［(3)］効果の実験に関する記述である。

図のような，陽極 P，陰極 K の光電管を，電流計 A，電圧計 V，および電源 S に接続した装置を考える。以下，電子の電荷を $-e=-1.6\times10^{-19}$C，プランク定数を $h=6.6\times10^{-34}$ J·s，真空中の光の速さを $c=3.0\times10^{8}$m/s とする。

陰極 K に対する陽極 P の電位を正の一定値に保ったまま，陰極 K にさまざまな波長の光を照射したところ，波長が $\lambda_0=4.0\times10^{-7}$m より長い場合，光の強さにかかわらず電流計 A の針は振れなかった。これは，一個の電子の受け取るエネルギーが光の強さに無関係であることを示している。一方，波長が λ_0 より短い場合には，たとえ弱い光でも，わずかに電流計 A の針が振れ，光の強さを増すと針の振れが増した。これは，一個の電子の受け取るエネルギーが光の波長と無関係ではなく，波長が短い（振動数が大きい）ほどエネルギーが大きいこと，また，電子が陰極 K から飛び出すには $W=$［(5)］$\times10^{-19}$J 以上のエネルギーが必要であることを示している。このエネルギー W を［(6)］と呼ぶ。

陰極 K に，波長が 1.4×10^{-7}m の光を一定の強さで照射したまま，陰極 K に対する陽極 P の電位を下げていったところ，途中から電流計の針の振れが減りはじめ，［(7)］V で，まったく振れなくなった。これは陰極から飛び出した電子が，陽極との間の電場に逆らって陽極へ到達することができなくなったからである。



(1) の解答群

① 回折　② 励起　③ 散乱　④ 遷移

(2) の解答群

① 粒子　② 波動　③ 原子　④ コンプトン

(3) の解答群

① 回折　② コンプトン　③ ドップラー　④ 光電

(4) の解答群

① 粒子　② 波動　③ 原子　④ 散乱

(5) の解答群

① 2.5　② 3.1　③ 5.0　④ 8.2

(6) の解答群

① 起電力　②表面張力　③ 仕事関数　④ インダクタンス

(7) の解答群

① −2.5　② −3.1　③ −4.6　④ −5.7

テキスト解答

第１講　解答

1

（i）

① 光電効果　② 光電子　③ 仕事関数　④ $h\nu$

⑤ $h\nu - W$　⑥ $\sqrt{\dfrac{2(h\nu - W)}{m}}$

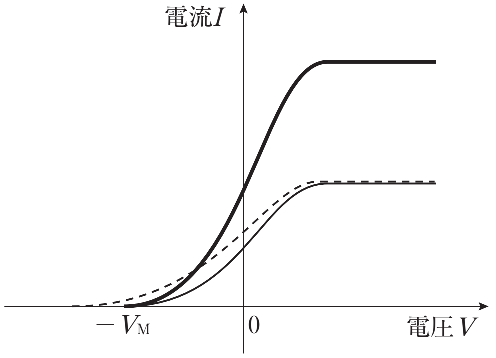
（ii）

⑦ 6.6×10^{-19}　⑧ 1.8×10^{-19}　⑨ 4.8×10^{-19}

2

問１　(a) 光電効果　(b) 光電子　(c) 増加　(d) en

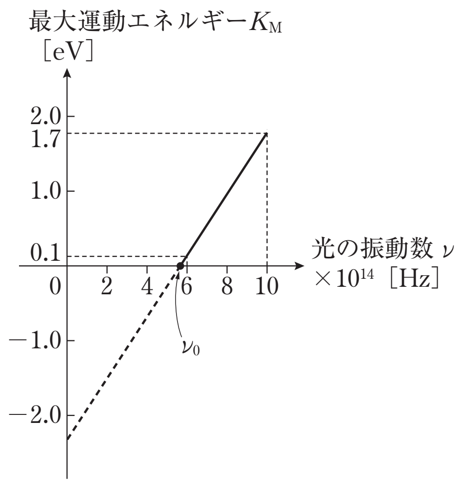
問２　次図の太線　　問３　次図の点線



問４　(e) eV_M　(f) $\sqrt{\dfrac{2eV_M}{m}}$

問５　(g) 0.7　(h) 2.3　(i) 限界振動数　(j) $h\nu_0$

グラフ…次図



確認テスト解答

第１講　確認テスト

【解答】

⑴　①　⑵　②　⑶　④　⑷　①　⑸　③　⑹　③　⑺　④

【解説】

⑴　波動だけの性質は<u>回折</u>

⑵　干渉や回折，重ね合わせの原理は<u>波動</u>の性質

⑶　電子が光のエネルギーをもらって飛び出すのは<u>光電</u>効果

⑷　<u>粒子</u>

⑸　$W=\dfrac{hc}{\lambda_0}=\dfrac{6.6\times10^{-34}\times3\times10^{8}}{4.0\times10^{-7}}=4.95\times10^{-19}\,[\mathrm{J}]$

$\fallingdotseq \underline{5.0}\times10^{-19}\,[\mathrm{J}]$

⑹　<u>仕事関数</u>

⑺　$e|V|=\dfrac{hc}{\lambda}-W$

$\therefore\quad |V|=\dfrac{1}{e}\left(\dfrac{hc}{\lambda}-W\right)=\dfrac{1}{1.6\times10^{-19}}\left(\dfrac{6.6\times10^{-34}\times3\times10^{8}}{1.4\times10^{-7}}-4.95\times10^{-19}\right)\fallingdotseq 5.74$

$\fallingdotseq 5.7$

よって，限界電圧は

$V=\underline{-5.7\,[\mathrm{V}]}$